



Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH

Langzeitsicherheits-
analysen für das End-
lager Konrad

Val
Grundwassermodell-
rechnungen mit dem
Programm NAMMU

Basisfall

Textband

GRS - A-1858/1

Langzeitsicherheitsanalysen für
das Endlager Konrad

Grundwassermodellrechnungen
mit dem Programm NAMMU

Basisfall

Textband



Dezember 1991
Auftrags-Nr.: 65300

Anmerkung:

Dieser Bericht ist von der GRS im Auftrag des TÜV Hannover im Rahmen der Begutachtung Konrad erstellt worden. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt werden bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muß nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Inhalt

		Seite
1	Einleitung	1
2	Beschreibung des Hydrogeologischen Modells	2
2.1	Modellraum und sein hydrogeologischer Aufbau	2
2.2	Hydrogeologische Daten und Randbedingungen	3
3	Umsetzung des Hydrogeologischen Modells in ein Rechenmodell	4
3.1	Modellkonzept und Diskretisierung	4
3.2	Eingabedaten und Interpretation der Randbedingungen	6
4	Ergebnisse der Rechnungen mit NAMMU	7
4.1	Rechnungen zum Basisfall "Störzonenmodell"	7
4.1.1	Grundwasserströmungsberechnungen	7
4.1.2	Bilanzierung des Grundwasserdurchsatzes im Rechenmodell	10
4.1.3	Trajektorienberechnungen	11
4.2	Rechnungen zur Parametervariation "Stratigraphisches Modell"	12
4.2.1	Grundwasserströmungsberechnung	12
4.2.2	Bilanzierung des Grundwasserdurchsatzes durch das Rechenmodell	13
4.2.3	Trajektorienberechnungen	14
5	Diskussion der Ergebnisse	15
6	Literatur	16
7	Zitierte Unterlagen	16

Verzeichnis der Tabellen

- Tab. 1: Standardprofil der Hydrogeologie des Untersuchungsgebietes;
Quelle: NLfB
- Tab. 2: NAMMU-Eingabedatensatz der Basisfallrechnung
- Tab. 3: Bandbreiten und erster Rechenwert der Schichtdurchlässigkeits-
beiwerte; Quelle: NLfB
- Tab. 4: Bandbreiten und erster Rechenwert der Gebirgsporositäten;
Quelle: NLfB
- Tab. 5: Farben und Zeichenerklärung der Modellgitterschnitte
- Tab. 6: Durchfluß durch den Schnitt 3 im Aufstromgebiet des Endlagers
- Tab. 7: Startpunkte, durchlaufende Einheiten, Laufwege, Laufzeiten und End-
punkte der Partikel in den Trajektorienberechnungen zum Basisfall "Stör-
zonenmodell"
- Tab. 8: Startpunkte, durchlaufende Einheiten, Laufzeiten und Endpunkte der
Partikel in den Trajektorienberechnungen zur Variante "stratigraphisches
Modell"

Verzeichnis der Bilder

Bild 1.1:	Untersuchungsgebiet des Endlagers Konrad; Quelle: NLfB
Bild 1.2:	NAMMU-Modellgebiet mit Lage der Modellschnitte
Bild 2.1-2-22:	2D-Modellgitterschnitte nach West-Ost-Schnittendes NLfB
Bild 3.1-3.2:	3D-NAMMU-Finite-Element-Gitter und Modellgitter Konrad
Bild 4.1-4.6:	Süd-Nord-Modellgitterschnitte
Bild 5.1-5.12:	Topographie des Modellgitternetzes der hydraulischen Einheiten
Bild 6:	Isopotentiallinien auf der Modelloberfläche; Grundwassergleichplan
Bild 7.1-7.13:	Basisfall "Störzonenmodell": Isopotentiallinien in West-Ost-Gitterschnitten
Bild 8.1-8.13:	Basisfall "Störzonenmodell": Darcy-Geschwindigkeiten in West-Ost-Gitterschnitten
Bild 9.1-9.4:	Basisfall "Störzonenmodell": Isopotentiallinien in Süd-Nord-Gitterschnitten
Bild 10.1-10.4:	Basisfall "Störfallzonenmodell": Darcy-Geschwindigkeiten in Süd-Nord-Gitterschnitten
Bild 11.1-11.8:	Trajektorienberechnungen des Basisfalles "Störfallzonenmodell", Seitenansicht und Aufsicht auf das 3D-Modell
Bild 12.1-12.13:	Variante "stratigraphisches Modell": Isopotentiallinien in West-Ost-Gitterschnitten
Bild 13.1-13.13:	Variante "stratigraphisches Modell": Darcy-Geschwindigkeiten in West-Ost-Gitterschnitten
Bild 14.1-14.4	Variante "stratigraphisches Modell": Isopotentiallinien in Süd-Nord-Gitterschnitten

Bild 15.1-15.4: Variante "stratigraphisches Modell": Darcy Geschwindigkeiten in Süd-Nord-Gitterschnitten

Bild 16.1-16.4: Variante "stratigraphisches Modell": Trajektorienberechnungen, Seitenansicht und Aufsicht auf das 3D-Modell

1 Einleitung

Im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens für das Endlager KONRAD wurde die GRS vom TÜV Hannover beauftragt, im Zusammenhang mit der Begutachtung der vom Antragsteller vorgelegten Langzeitsicherheitsanalysen Grundwassermodellberechnungen durchzuführen. Diesen Berechnungen liegen ein hydrogeologisches Modell und hydrogeologische Daten für das Standortgebiet zugrunde, welche das Niedersächsische Landesamt für Bodenforschung (NLF) als Gutachter der geologischen Verhältnisse entwickelt hat (Gutachterliches Modell). Dieses Modell weicht von dem hydrogeologischen Modell des Antragstellers ab. Im vorliegenden Bericht werden die Grundwassertransportrechnungen für dieses hydrogeologische Modell auf der Datenbasis des Gutachters /NLF 90/ vorgestellt und diskutiert. Es wird die Umsetzung des hydrogeologischen Modells in ein Rechenmodell für das Finite-Element-Programm NAMMU /ATK 85a,b/ aufgezeigt. Bei den Grundwassermodellrechnungen werden zwei Fälle definiert und berechnet, der Basisfall "Störzonenmodell" sowie in einer Variation der Parameter der Fall "Stratigraphisches Modell". Anschließend werden die erzielten Ergebnisse diskutiert.

2 Beschreibung des Hydrogeologischen Modells

Grundlage des von der GRS für die Modellierung in NAMMU benutzten Modelleingabedatensatzes sind die NLfB-Unterlagen /NLfB 90/. In diesen Unterlagen werden sowohl die Abgrenzung des Modellgebietes mit seinen Randbedingungen als auch der Schichtaufbau durch Standardprofile der Geologie und Hydrogeologie vorgegeben. Neben den Mächtigkeiten und den Verbreitungen der Schichten enthalten die Unterlagen die Bandbreiten der effektiven Gebirgsporosität und der hydraulischen Leitfähigkeiten der einzelnen hydrogeologischen Einheiten, sowie einen Vorschlag für den sogenannten ersten Rechenwert als Modelldatensatz. Zusätzlich wurden Tiefenlinienpläne der einzelnen hydrogeologischen Einheiten erstellt.

2.1 Der Modellraum und sein hydrogeologischer Aufbau

Das Modellgebiet erstreckt sich in seiner Süd-Nord-Ausrichtung über ca. 45 km und in der West-Ost-Richtung über ca. 15 km (Bild 1.1). Es besitzt eine maximale Teufe von ca. 3 km. Der südliche Modellrand wird ungefähr durch den Verlauf des Salzgitter-Höhenzuges gebildet. Ausgehend von der muldenförmigen Struktur des sich nach Norden anschließenden Untersuchungsraumes und den von Süden nach Norden streichenden Salzstrukturen, die die Grenzen des westlichen und östlichen Randes darstellen, wird von einem i. w. Süd-Nord gerichteten Grundwasserstrom ausgegangen. Den nördlichen Modellrand bildet die Aller-Niederung, wo der Einlagerungshorizont Oxford mit dem oberflächennahen Grundwasserstockwerk in hydraulischer Verbindung steht. In der Vertikalen wird das Liegende des Oberen Muschelkalkes (Salinar des Mittleren Muschelkalkes) als Modellbasis angenommen. Seine vollständige Verbreitung über die gesamte Modellbasis wird nicht vorausgesetzt. Jedoch wird unterstellt, daß das mögliche Fehlen des Salinars hydraulisch keine Wirkung auf das übrige Modellgebiet ausübt /NLfB 90/.

Im Modellraum wird entgegen den Modellvorstellungen des Antragstellers (12 Schichten) /EU 197/ in der NLfB-Vorgabe zwischen 19 hydrogeologischen Einheiten differenziert. Vor allem die zusätzlich in das Modell aufgenommenen Aquifere Wealden und Dogger- β -Sandstein stellen gegenüber den Antragsunterlagen mögliche neue Ausbreitungspfade dar. Hierbei findet insbesondere der Wealden-Aquifer aufgrund seiner Anbindung an das Oxford und seines Ausstreichens in den Oberflächenaquifer

(nordwestliches Modellgebiet) Beachtung. Eine weitere Neuerung gegenüber dem hydrogeologischen Modell des Antragstellers stellt die Anbindung des Oberen Keuper an den Oberflächenaquifer östlich des Salzstockes Thiede dar. Der Transgressionshorizont Einheit 8 wurde aufgrund neuer Erkenntnisse nicht modelliert /NLfB 90/. Die Lage, die Verbreitung und die Mächtigkeiten von 18 Einheiten sind in hydrogeologischen Schnitten bzw. hydrogeologischen Tiefenlinienplänen dargestellt.

In der Umgebung von Störungen und an den Salzstockrändern treten Zonen unterschiedlich starker Zerrüttung auf. In diesen bis zu 500 m beidseitig der Störungen verbreiteten Zonen sind die betroffenen hydrogeologischen Einheiten mit größeren Durchlässigkeitbeiwerten und Porositäten behaftet. Dabei werden die Zerrüttungszonen nach /NLfB 90/ in drei Beanspruchungsbereiche unterteilt.

2.2 Hydrogeologische Daten und Randbedingungen

Die Porosität- und Durchlässigkeitsbeiwerte für den ersten Rechenlauf wurden vom NLfB vorgegeben (Tab. 3. u. 4). In den Zerrüttungszonen ist im Vergleich zum umgebenden Gebirge eine größere effektive Gebirgsporosität und -durchlässigkeit angenommen worden. Diese Erhöhung der hydraulischen Parameter wurde im Gegensatz zu den Daten des Antragstellers für den Basisfall "Störzonenmodell" mit einem einheitlichen Faktor 10 für alle Störungssysteme belegt.

Die physikalischen Randbedingungen auf den Modellrändern wurden folgendermaßen definiert:

- zeitlich konstante Potentialverteilung an der Modelloberfläche über die Grundwassergleichen des oberen Aquifer bzw. im Wiederergänzungsgebiet der tieferen Aquifere am Salzgitter-Höhenzug über die topographische Geländehöhe
- vertikale Ränder des Modellgebietes sind als undurchlässig zu modellieren
- die Modellbasis ist hydraulisch geschlossen (/NLfB 90/).

3 Umsetzung des Hydrogeologischen Modells in ein Rechenmodell

3.1 Modellkonzept und Diskretisierung

Bei der Umsetzung des hydrologischen NLFB-Modellansatzes des Standortes Konrad in ein numerisches Modell für das Programm NAMMU erfolgt als erstes die Übertragung der geologischen Struktur mit ihren Schichtgliedern in ein Maschennetz von Finite-Elementen. Dabei folgt die Berandung des Rechenmodells in NAMMU den Rändern des hydrogeologischen Modells (Bild 1.2).

Im vorliegenden Fall wurde die Maschennetzgenerierung anhand von 30 hydrogeologischen West-Ost-Schnitten durchgeführt, weil die Hauptkomplexität der regionalen Geologie in der vertikalen Sequenz verschiedener hydrogeologischer Einheiten besteht. Insgesamt wurden die 19 verschiedenen hydrogeologischen Einheiten in 18 Modellschichtbelegungen überführt und mit Durchlässigkeitsbeiwerten und Porositätswerten belegt.

Die hydrogeologischen Einheiten Quartär und Tertiär bzw. Mittlerer und Unterer Keuper wurden aufgrund der äquivalenten Durchlässigkeitsbeiwerte und Porositäten zu jeweils einer Einheit zusammengefaßt. Der Wealden wurde aufgrund der definierten Differenzierung zwischen Nord- und Südmodellgebiet durch zwei hydrogeologische Einheiten charakterisiert. Zusätzlich wurde Zechsteinsalz als neunzehnte Einheit aufgenommen.

Störungen wurden nach Vorgabe des NLFB nicht als engbegrenzte Diskontinuitäten betrachtet, sondern als mehr oder weniger breite Zonen erhöhter Auflockerung beidseitig der eigentlichen Störung abgebildet. In diesen ca. 500 m breiten Zonen beidseitig der Störungen und an den Salzstockrändern können die einzelnen hydrogeologischen Einheiten je nach Zerrüttungsgrad mit unterschiedlich hohen Durchlässigkeiten belegt werden. Mit den drei möglichen Zerrüttungsgraden und den hydrogeologischen Einheiten waren somit insgesamt 80 unterschiedliche Modellschichtbelegungen vorzunehmen.

Zuerst wurden 2D-Gitternetze anhand der Vertikalschnitte generiert, wobei jedes Schichtglied, in diesem Fall jede hydrogeologische Einheit, vertikal mit einem Element

beschrieben wurde (Bilder 2.1-2.22). Durch die Wahl von 2D-Elementen mit quadratischer Ansatzfunktion erhält jedes Element einer Schicht 9 Stützpunkte (Knoten), für die die Ansatzfunktionen gelöst werden. Damit ist jede Schicht in der Vertikalen mit 3 Knoten hinreichend bestimmt.

Im 3D-Modell wurden prismatische Elemente zur Modellierung auskeilender Schichtglieder längs des zu erwartenden höchsten Grundwasserdurchflusses in der Süd-Nord-Anbindung der Schnitte benutzt. Durch dieses Vorgehen bei der Diskretisierung bleibt die Anzahl der vertikalen Elemente in einem West-Ost-Schnitt erhalten. Damit konnte in der Durchsatzfläche des zu erwartenden höchsten Grundwasserdurchflusses die Diskretisierungsintensität einer hydrogeologischen Einheit beim gleichzeitigen Wegfallen einer anderen erhöht werden. Zusätzlich wurden zur Gitterverfeinerung in Ost-West-Richtung vertikalstehende prismatische Elemente eingeführt.

Nach einer Überprüfung wurden die generierten 2D-Modellgitterschnitte zu einem 3D-Maschenetz zusammengefügt (Bild 3.1-3.2). Hierfür wurden zunächst die Netzfeldabschnitte zwischen den 2D-Modellgitterschnitten beschrieben, wobei im einzelnen zu identifizieren war, welche Blöcke der einzelnen Schnitte miteinander zu verbinden waren. Nach einer Überprüfung brauchten 8 der 30 West-Ost-Schnitte nicht benutzt werden, da weder die Lage noch die Mächtigkeit oder Sequenz der hydrogeologischen Einheiten wesentliche Veränderungen gegenüber benachbarten Schnitten aufwiesen. Auskeilende Schichtglieder wurden in Süd-Nord-Richtung durch prismatische, alle anderen durch quaderförmige Elemente modelliert. Bild 3.1 zeigt das Finite-Element-Modellgebiet und Bild 3.2 die 3D-Ansicht auf einige der benutzten Modellgitterschnitte.

Die Belegung der 3D-Elemente der Süd-Nord verlaufenden vertikalen Gitterebenschnitte wurde anhand der hydrogeologischen Süd-Nord-Schnitte überprüft. Sie zeigen das Modellgitternetz in der Verbindung der einzelnen West-Ost-Netzgitterschnitte (Bilder 4.1-4.6), wobei auftretende Fehlbelegungen in der Anbindung der 2D-Schnitte erkennbar werden und sich korrigieren lassen. Im weiteren wurden zur Überprüfung der abgebildeten Geologie Projektionen hydrogeologischer Einheiten auf die horizontale Ebene erzeugt und mit den geologischen Tiefenlinienplänen verglichen (Bilder 5.1-5.12). Auf diese Weise wurden Abweichungen des numerischen Modells vom hydrogeologischen in den Schichtbildern sowie verzerrte Elemente entdeckt und korrigiert.

Durch diese Vorgehensweise wurde das numerische Modell der hydrogeologischen Interpretation des Standortes Konrad angepaßt. Nach Abschluß der Diskretisierung besitzt das NAMMU-Rechenmodell nunmehr ca. 200 quadratische Oberflächenelemente bzw. das 3D-Modellgitter 628 prismatische Elemente (Dreieckprismen) mit 18 Stützpunkten und 2 024 quaderförmige Elemente mit 27 Stützpunkten. Insgesamt enthält das Modell 21 128 Stützstellen (Knoten).

0.1 Eingabedaten und Interpretation der Ranbedingungen

Nach der Modellgenerierung wurde ein Basisfall "Störzonenmodell" definiert, dessen Datensatz mit den hydraulischen Kennwerten und Randbedingungen des NLfB-Datensatzes für den ersten Rechenlauf übereinstimmt und in der Tabelle 3 aufgelistet ist. Die die Muldenstruktur an der Modellbasis begrenzenden gering permeablen salinaren Schichten des Mittleren Muschelkalkes bzw. die die Mulde seitlich bis zur Modellbasis begrenzenden Salzdome und -mauern des Zechstein wurden i.a. nicht diskretisiert, sondern bilden als "no-flow boundaries" die Modellgrenzen, über die kein Wasseraustausch möglich ist. Als weitere vertikale "no-flow-boundaries" wurden die nördlichen und südlichen Modellgrenzen angesetzt.

Die südliche Randbedingung wird begründet mit der Grundwasserscheide des tieferen Aquifersystems am Salzgitter-Höhenzug, d.h. dem Ausstreichen der tiefsten Aquifer an die Erdoberfläche. Am nördlichen Rand streichen die Aquifere bis zur hydrogeologischen Einheit Combrash unter das Quartär aus. Durch diese Wahl der Randbedingungen wird das gesamte im Wiederergänzungsgebiet der tieferen Aquifere eindringende Grundwasser durch die Aquifere des Modellgebietes gezwungen und im Grundwasserabflußgebiet in den obersten Aquifer eingespeist. Damit findet der gesamte Wasseraustausch über die Modelloberfläche statt, die ihrerseits über den obersten Aquifer mit einer zeitlich konstanten Druckrandbedingung belegt wird. Diese Druckwasserrandbedingung gibt die Grundwassergleichenkarte des NLfB /NLfB 90/ bzw. in den Gebirgszügen die Topographie des Modellgebietes als freie Grundwasser Oberfläche wieder (Bild 6).

4 Ergebnisse der Rechnungen mit NAMMU

Das Ergebnis der im Kapitel 3 beschriebenen Erstellung eines NAMMU-Rechenmodellgitters ist ein dreidimensionales numerisches Modell des Endlagerstandortes Konrad. Hierbei zeigen die abgebildeten Modellgitterschnitte (Bilder 2.1-2.22), daß sich auch komplizierte hydrogeologische Systeme mit mehreren zum Teil auskeilenden und in der Schichtmächtigkeit stark schwankenden Aquiferen und Aquitarden mit den NAMMU-Prozeduren hinreichend genau abbilden lassen. Dabei ist insbesondere die flächentreue bzw. raumtreue Abbildung durch die angewendeten verschiedenen Finite-Elemente möglichst gut angenähert.

Dieses generierte 3D-Modell (Bild 3) dient als Grundlage der nachfolgenden Rechnungen zum Basisfall "Störzonenmodell" und zur Parametervariation "stratigraphisches Modell".

4.1 Rechnungen zum Basisfall "Störzonenmodell"

4.1.1 Grundwasserströmungsberechnung

Der NLFb-Datensatz der Rechnungen zum Störzonenmodell wird durch die beiden Tabellen 3 und 4 dargestellt, wobei jeweils die Rechenwerte (3. Spalte) als Durchlässigkeitsbeiwerte bzw. Porositätswerte der Schichten benutzt wurden. Aus modelltechnischen Gründen wurde - abweichend von der NLFb-Vorlage - der Aquifer der Einheit Oberer Keuper isotrop modelliert, was aufgrund der höher angesetzten Durchlässigkeit senkrecht zur Schichtung als konservativ bzgl. der Durchströmungsrate durch das Endlager gelten muß. Außerdem wurden keine unterschiedlichen Durchlässigkeitsbeiwerte entsprechend den Zerrüttungsgraden definiert, sondern ein einheitlicher Faktor für alle Grade angesetzt.

Dieser Fall entspricht einer Modellvorstellung, wie sie der Antragsteller im BGR-Störzonenmodell berücksichtigt und im Modell für das Programm FEM301 verwirklicht hat /EU 210/. Im Gegensatz zu den Rechnungen des Antragstellers wurden die Durchlässigkeiten verschiedener Störzonen nicht differenziert, sondern erhielten mit dem Faktor 10 die gleiche Leitfähigkeitserhöhung.

Als Ergebnis der NAMMU-Basisfallrechnung zeigen die Bilder 7.1-7.13 und 8.1-8.13 die Druckpotentialfelder und Darcy Geschwindigkeitsfelder in West-Ost Modellgitterschnitten für die Bereiche der Wiederergänzung, für den Endlagerbereich, für die Modellmitte sowie für die Bereiche des Grundwasserabstroms über die relevanten Aquifere aus dem Modell.

Die Pfeile in den Geschwindigkeitsplots stellen eine Projektion der Einheitsvektoren von Darcy-Geschwindigkeiten in den Elementzentren der Schnittebene dar. Richtung und Pfeillänge geben die Raumrichtung der Geschwindigkeit an, dabei wird der Winkel zur Flächennormalen umso kleiner, je kürzer die Pfeillänge ist. Gleichzeitig gibt die Farbe der Pfeile die Geschwindigkeitsbereiche wieder. Das heißt: Alle Pfeile dunkelblauer Farbe liegen im Bereich eines definierten Geschwindigkeitintervalls, wobei innerhalb eines Intervalls die Größe der Pfeilspitze die Geschwindigkeitshöhe widerspiegelt. Die Farbänderung von dunkelblau über rot nach grün stellt eine Abstufung der Intervalle zu kleineren Geschwindigkeiten dar.

Im Bild 7.1 (Wiederergänzungsgebiet) zeigen die senkrecht zu den Schnittflächen stehenden Isopotentiallinien in den Aquiferen Oberer Muschelkalk, Oberer Keuper und Hilssandstein den Grundwassereinstrom in die tieferen Aquifere über das Wiederergänzungsgebiet des Salzgitter-Höhenzuges auf. Die geschlossenen Potentiallinien deuten gleichzeitig den aufgrund des Salzstockes Flachstöckheim erzwungenen Grundwasserstrom nach Norden an.

Die Bilder 7.2-7.4 und 8.2-8.4 zeigen die Druck- und Geschwindigkeitsfelder in Ost-West-Vertikalschnitten vor dem und durch das Endlager. Im Alb verlaufen die Isopotentiallinien engständig ungefähr parallel der horizontalen Schichtlagerung. Sie zeigen über diese gering permeable Schicht einen starken Potentialabbau zur Modelloberfläche. Der vertikale Bereich zwischen dem Hilssandstein und der Modellbasis weist ein schwaches Druckfeld auf. Bedeutend dabei ist, daß in der Endlagerformation Oxford im Bereich des Konradgrabens ein niedrigeres Potential vorliegt als im Hilssandstein darüber. Dies erzeugt in diesem Bereich einen aus dem Hilssandstein gerichteten Grundwasserstrom in die Nebengesteine der Unterkreide (Tone). Erst der unterste Aquifer (Oberer Muschelkalk) liegt in etwa auf gleichem Druckniveau wie der Hilssandstein.

Somit entwässert der Hilssandstein vermehrt in das Liegende, wobei der Endlagerbereich mit Grundwasser aus dem Hangenden gespeist wird. Die Darcy-Geschwindigkeitsvektoren innerhalb der Aquitarden zeigen im allgemeinen einen dem Potentialgefälle folgenden aufwärts gerichteten Grundwasser-Strom zu den Aquifern. Ausgenommen hiervon sind die abwärts gerichteten Darcy-Geschwindigkeiten im Liegenden des Hilssandstein. Sie deuten wieder die Infiltration des Hilssandsteins in die liegenden Tone der Unterkreide an, die wiederum in den Wealden und den Kimmeridge entwässern. Dies wiederum hat einen in diesem Bereich erhöhten abwärts gerichteten Grundwasserstrom aus dem Oxford in das Liegende zur Folge. Auch nach Ausbeiben des Hilssandstein nördlich des Endlagers (ab Schnitt 11) liegt ein flaches Druckgefälle aus den Einheiten Oxford und Kimmeridge zu den liegenden Einheiten einschließlich des Oberen Keuper vor (Bild 7.5). Erst der Obere Muschelkalk besitzt ein vergleichbar hohes Potential wie des Oxford. Dies bewirkt einen vermehrten Abstrom von Grundwasser aus der Endlagerformation in die liegenden Einheiten.

Im Abstrom des Endlagers ist das Druckgefälle ab Schnitt 13 (Bild 7.6) zwischen der Endlagerformation und dem Liegenden sehr flach. Es deutet sich im zentralen Bereich ein Süd-Nord-Strom bzw. am Ostrand eine östlich zum Salzstock Thiede hin gerichtete Strömung an (Bild 7.4-7.5). Sie ist sowohl an den senkrecht zu den Schichtflächen der Aquifere stehenden Potentiallinien als auch an den höheren Darcy-Geschwindigkeiten zu erkennen. Hervorgerufen wird diese erhöhte West-Ost-Strömung durch die Anbindung der beiden tieferen Aquifere Oberer Keuper und Oberer Muschelkalk an die Oberfläche hinter dem Salzstock Thiede. Zu erkennen ist dieser Grundwasserausstrom an den fast vertikalen Geschwindigkeitsvektoren des Elements der rechten äußeren Modellecke, die den Ausstrich der hydrogeologischen Einheit Oberer Keuper charakterisiert. Die höchsten ostgerichteten Strömungsanteile treten neben dem Quartär im Hilssandstein auf. Hervorgerufen wird diese West-Ost-Strömung im Hilssandstein durch den Gradienten zwischen Salzgitter-Höhenzug und dem Ausstrich westlich von Thiede.

Im weiteren Abstrom des Endlagers ab Schnitt 15 (Bild 7.6 ff) entsteht ein Potentialgefüge mit einem generellen Gradienten zur Oberfläche, wobei das Oxford aus dem Oberen Keuper mit Grundwasser gespeist wird und seinerseits Grundwasser in das Hangende abgibt. Im Ausstrich der für die Ausbreitung aus dem Endlager bedeutenden Aquifere zeigt der Grundwasserstrom die Anbindung des Wealden an den Ober-

flächenaquifer. Der Hauptwasserstrom verläuft in der Auflockerungszone des Salzstockes Broistedt-Wendeburg am nordwestlichen Modellrand.

Der Hauptstrom des Grundwassers in den tieferen Aquifern folgt dem regionalen hydraulischen Gradienten von Süd nach Nord. Deutlich wird dies in den Bildern 9.1-9.4 und 10.1-10.4, in denen die Potentialfelder und die aus den Potentialfeldern abgeleiteten Darcy-Geschwindigkeiten in Süd-Nord-Schnitten dargestellt sind.

4.1.2 Bilanzierung des Grundwasserdurchsatzes im Rechenmodell

Zur Überprüfung der Druck- und Darcy-Geschwindigkeitsberechnung wurde im Zustromgebiet des Endlagers der Grundwasserdurchsatz aus den Rechenergebnissen abgeschätzt. Hierzu wurden im Schnitt 3 (Bild 2.3) die Durchsatzflächen (E-W-Richtung) aller dort ausgehaltenen hydrogeologischen Einheiten berechnet und mit den entsprechenden N-S (normal zur Fläche) gerichteten Darcy Geschwindigkeitskomponenten multipliziert. Das Ergebnis wird in Tabelle 6 als N-S-Grundwasserfluß jeder hydrogeologischen Einheit dargestellt. Besonders hervorzuheben sind hierbei die Grundwasserflüsse, die dem Modell über die im Süden ausstreichenden hydrogeologischen Einheiten Rhät oder Oberer Muschelkalk zutreten. Sie stellen die Grundwassermenge dar, die in den tieferen Aquifern des hydrogeologischen Modells über das Wiederergänzungsgebiet im Süden (Salzgitter-Höhenzug) zuströmen. Die so abgeschätzten Grundwasserzuflüsse in das Liegende des Endlagers betragen 3,75 l/s für die Einheit Oberer Keuper und 1,92 l/s für die Einheit Oberer Muschelkalk. Dies entspricht einem Gesamtfluß von 5,67 l/s und damit einer entsprechenden Wiederergänzung über den Salzgitter-Höhenzug, was aus den örtlichen Gegebenheiten erwartet werden kann.

Im weiteren wurde für das Endlager eine Bilanzierung der Zuflüsse in das Endlager und Abflüsse aus dem Endlager durchgeführt. Hierbei sind insbesondere die Zuflüsse in das Endlager von Bedeutung, da sie mit Ergebnissen anderer Rechenmodelle verglichen werden können. Gleichzeitig werden sie zur Berechnung der Nuklidfreisetzung für nachfolgende Radionuklidtransportrechnungen benötigt. Das Endlager wird im NAMMU-Modell durch mehrere Finite-Elemente charakterisiert. Die Bilanzierung wurde für die Elemente durchgeführt, indem die Flächeninhalte der Elementseiten berechnet und mit den Darcy-Geschwindigkeiten normal zu diesen Seiten multipliziert

wurden. Bei der Abschätzung der Zuflüsse in das Endlager ist die Gesamtfläche der hier betrachteten Elemente größer als die Eintrittsoberfläche des eigentlichen Endlagers. Dies liegt an der größeren Dimensionierung der das Endlager charakterisierenden Finite-Elemente gegenüber dem Endlager selbst. Damit wird jedoch der Einstrom in das Modellendlager überschätzt. Das Ergebnis der Bilanzierung ist ein Gesamtzustrom in das Endlager von 2990 m³/a, wobei der größte Grundwasserzufluß mit 2326 m³ über eine 4,7 km² große Fläche aus dem Hangende des Oxford zutritt. Dies steht im Einklang mit den schon beschriebenen vertikalen Darcy Geschwindigkeitskomponenten im Hangenden des Endlagers und der Einspeisung aus dem Hilssandstein. Der Zustrom von Westen in das Endlager ist mit 212 m³/a halb so groß wie der Grundwasserzufluß aus dem Süden ($Q = 452 \text{ m}^3/\text{a}$). Der hier abgeschätzte Wert des Zuflusses in das Endlager steht im Einklang mit berechneten Werten des Antragstellers. Der größte Abstrom erfolgt über die Endlagerbasis mit 1798 m³/a. Der Bilanzierungsfehler zwischen abgeschätzten Ein- und Ausstrom liegt bei ca. 10 %, was für FE-Lösungsverfahren zu erwarten ist.

4.1.3 Trajektorienberechnungen

Die Berechnung der Grundwasserlaufzeiten und Laufwege wurden in NAMMU mittels Trajektorienberechnungen durchgeführt. Dabei werden in NAMMU über die Druckverteilung im Modell und die definierten effektiven Porositäten der hydrogeologischen Einheiten mit Hilfe von Particle-Tracking-Verfahren Stromlinien berechnet, die Fließwege nicht retardierender Tracer im Strömungsfeld darstellen. Die Ergebnisse der Trajektorienberechnungen sind je nach Startpunkt im Endlager verschiedene Stromlinien.

Für die im nordöstlichen Bereich des Endlagers gestarteten Partikel ist innerhalb des Konradgrabens ein Abtauchen über die Jura-Tone in den Combrash und z.T. auch in den Dogger- β -Sandstein zu erkennen. In der Modellmitte treten sie wieder nach oben in das Oxford ein, durchlaufen vertikal die Einheiten Oxford, Kimmeridge, Unterkreide (einschließlich des Alb) und erreichen nach einer Laufzeit von mehreren Millionen Jahren die Modelloberfläche (Bilder 11.1-11.2).

Die Trajektorien der im nordwestlichen Endlagerbereich gestarteten Partikel zeigen einen ähnlichen Weg (Bilder 11.3-11.4). Jedoch treten die Partikel in der Modellmitte

über Oxford und Kimmeridge in das Wealden ein und folgen dem schichtparallelen Grundwasserstrom entlang des nordwestlichen Modellrandes. Die meisten Partikel gelangen über den Wealden im Nordwesten an die Erdoberfläche. Die Laufzeiten der Partikel liegen zwischen 800 000 und 3 600 000 Jahren (Tab. 7).

Die im südlichen Endlagerbereich außerhalb des Konradgrabens gestarteten Partikel treten innerhalb des Oxford in den Konradgraben-Störzonenbereich ein, tauchen senkrecht über die Jura-Tone und den Cornbrash in den Dogger- β -Sandstein ab und verlassen in ihm den Störzonenbereich (Bilder 11.5-11.8). Nördlich des Konradgrabens treten die Partikel über die Keuper-Tone nach unten in den Oberen Keuper ein und verlaufen über den Oberen Keuper zur Oberfläche. Die Austrittsorte der Trajektorien befinden sich zum einen nördlich des Salzstockes Thiede, zum anderen innerhalb des Röhme-Störungsbereiches. Die Laufzeiten liegen zwischen einer und mehreren Millionen Jahren (Tab. 7).

4.2 Rechnungen zur Parametervariation "Stratigraphisches Modell"

Die aus dem NLfB-Datensatz abgeleitete Parametervariation "Stratigraphisches Modell" ist vergleichbar einer Modellvorstellung, wie sie der Antragsteller in den Basismodellen für die Programme SWIFT /EU 76.1/ und FEM301 /EU 210/ berücksichtigt hat. Gegenüber dem Basisfall "Störzonenmodell" wurden die erhöhten Durchlässigkeiten der Störzonen nicht betrachtet. Damit sind Störzonen nur hydraulisch wirksam, wenn sie Aquifere gegeneinander versetzen.

4.2.1 Grundwasserströmungsberechnung

Der Hauptstrom des Grundwassers in den tieferen Aquiferen folgt wiederum dem regionalen hydraulischen Gradienten von Süden nach Norden (Bilder 14.1-14.4). Das Alb zeigt den starken Potentialabbau zur Modelloberfläche. Der vertikale Bereich zwischen dem Hilssandstein und der Modellbasis weist ein schwaches Druckfeld auf. Die Endlagerformation Oxford besitzt im Bereich des Endlagers ein kleineres Druckpotential als der Hilssandstein im Hangenden (Bilder 12.2-12.4). Dies bedeutet einen aus dem Hilssandstein gerichteten Grundwasserstrom in die liegende Unterkreide (Bilder 13.2-13.4). Erst im Oberen Muschelkalk liegt das Potential in etwa auf gleicher Höhe wie im Hilssandstein. Somit wird der Endlagerbereich sowohl von unten als auch von

7

oben mit Grundwasser gespeist. Dies wiederum hat einen erhöhten Grundwasserstrom schichtparallel der Endlagerformation Oxford zur Folge. Mit Ausbeißern des Hils-sandsteins nach Norden (ab Schnitt 11) verändert sich diese Situation. Jetzt verläuft das Druckgefälle innerhalb der Endlagerformation sehr flach bzw. ist im Ausstrich unter das Deckgebirge zum Ostrand gerichtet. Dies deutet im zentralen Bereich des Modellgebietes auf einen Süd-Nord-Strom bzw. am Ortsrand auf eine östliche Strömung zum Salzstock Thiede hin (Bilder 12.4 u. 13.4).

Im Abstrom des Endlagers entsteht ein Potentialgefüge mit einem generellen Gradienten zur Oberfläche (Bilder 12.6-12.7), wobei das Oxford aus dem Oberen Keuper mit Grundwasser gespeist wird und seinerseits Grundwasser in das Hangende abgibt (Bilder 13.6-13.7). Im Ausstrich der für die Ausbreitung aus dem Endlager bedeutenden Aquifere zeigt der Grundwasserstrom die Anbindung des Wealden an den Oberflächenaquifer (Bild 13.10-13.13). Innerhalb der Aquifere Wealden bis Oxford verläuft der Hauptgrundwasserstrom von Süden nach Norden zum nordwestlichen Modellrand.

4.2.2 Bilanzierung des Grundwasserdurchsatzes durch das Rechenmodell

Bei der Bilanzierung des Grundwasserdurchsatzes im Anstromgebiet des Endlagers ergaben sich bei der Parametervariation "Stratigraphisches Modell" gegenüber dem Basisfall nur geringe Änderungen (Tabelle 6). Die Zuflüsse in das Liegende des Endlagers über die am Salzgitter-Höhenzug ausstreichenden Aquifere Rhät und Oberer Muschelkalk liegen mit 3,4 l/s und 1.65 l/s in der gleichen Größenordnung wie im Basisfall, was aufgrund der geringeren Leitfähigkeitsänderungen im Schnitt 3 gegenüber dem Basisfall zu erwarten war. Demgegenüber ist die Veränderung des Zuflusses, des im Konradgrabenbereich liegenden Endlagers erheblich. Im Basisfall wird dieser gestörte Bereich mit einer Leitfähigkeitserhöhung um den Faktor 10 gegenüber der ungestörten Fazies belegt. Die Bilanzierung der Rechnung ohne Leitfähigkeitserhöhung ergab einen Zufluß ins Endlager von 652 m³/a, wobei die Anteile mit 280 m³/a aus dem Hangenden, mit 211 m³/a aus Westen und mit 162 m³/a aus Süden annähernd gleich groß sind. Der Hauptabstrom erfolgt annähernd gleich groß über die Endlagerbasis und nach Norden. Der Fehler in der Bilanzierung lag bei 8,5 %.

4.2.3 Trajektorienberechnungen

Aufgrund des höheren Potentials im Hilssandstein tauchen die im Endlager gestarteten Partikel im Bereich des Endlagers über die Jura-Tone in den Cornbrash ab und folgen schichtparallel dem Grundwasserstrom nach Norden. In der Modellmitte steigen sie über die Jura-Tone wieder in das Oxford und durchlaufen mit Ausnahme einer Trajektorie die Einheiten Oxford, Kimmeridge und Wealden. Die Partikel erreichen im Wealden die Oberfläche. Der Ausstrich der Trajektorien befindet sich aufgrund der Verbindung des Wealden mit dem Quartär-Aquifer im Nordwesten des Modellgebietes. Dieser Fließweg kommt unter Umständen deshalb zustande, weil im Gegensatz zum Antragsteller vom Gutachter das sandige Valangin und Wealden als hydrogeologische Einheit gesondert diskretisiert wurde. Die Laufzeiten der Partikel sind aufgrund des vertikalen Durchlaufens der Jura-Tone und des längeren Verbleibs im Oxford bzw. Kimmeridge mit 1,2 bis 3,3 Millionen Jahren entsprechend lang (Tab. 8).

Einen ähnlichen Ausbreitungsweg zeigen die aus dem nördlichen Endlagerbereich gestarteten Partikel (Bilder 16.1-16.4). Zuerst treten alle Partikel nach unten über die Tone des Jura in den Cornbrash (z.T. über weitere Jura-Tone in den Dogger- β -Sandstein), verlaufen dort schichtparallel und werden in der Modellmitte wieder nach oben in das Oxford befördert. Nach mehr als 1,2 Millionen Jahren gelangen sie im Nordwesten an die Oberfläche.

5 Diskussion der Ergebnisse

Den Rechnungen der GRS lag der hydrogeologische Datensatz des NLfB zugrunde /NLfB 90/. Primäres Ergebnis dieser Rechnungen sind die Druckfelder im Modellraum, woraus die Geschwindigkeitsfelder ermittelt werden. Die Ermittlung der Partikellaufwege und -laufzeiten mittels Particle-Tracking-Verfahren unterliegen Einschränkungen, die in /GRS 90/ dargestellt sind. Die ermittelten Laufwege stellen Stromlinien dar und erfassen nicht den dispersiven bzw. diffusiven Transport einer Nuklidwolke. Für die beiden Varianten des Basisfall "Störzonenmodell" und Parametervariation "Stratigraphisches Modell" wurden Partikellaufzeiten vom Endlager zur Modelloberfläche ermittelt. In beiden Varianten stellt das Oxford aufgrund seiner relativ hohen schichtparallelen Abstandsgeschwindigkeit einen Transportweg dar, der jedoch von Particle-Tracking-Verfahren nicht vollständig erfaßt wird. Im Oxford werden Abstandsgeschwindigkeiten zwischen 0,06 m/a und 0,1 m/a errechnet; daraus lassen sich Partikellaufzeiten abschätzen, die größer sind als die vom Antragsteller ermittelten 300 000 Jahre /EU 76.1/. Gleichzeitig stellt der Ausbreitungsweg über Oxford, Kimmeridge und Wealden bei ähnlichen hohen Laufzeiten, aber mit ca. 30 km Laufweg gegenüber den 33 km in den Antragstellerrechnungen /EU 76.1/ eine zusätzliche Ausbreitungsvariante dar. Dieser Ausbreitungsweg ist bei nachfolgenden Radionuklidtransportrechnungen berücksichtigt worden.

6 Literatur

- /ATK 85a,b/ Atkinson, R.; A.W. Herbert; C.P. Jackson; P.C. Robinson
NAMMU User Guide
AERE-R. 11364, 11365, May 1985
- /GRS 90/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit
Baltes, B., Bogorinski, P., Larue, J.:
Zwischenbericht zur Begutachtung des Endlagers für radioaktive
Abfälle
Schachanlage Konrad Salzgitter
GRS-A-1730 (November 1990)
- /NLfB 90/ Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung
Eingabedaten für Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit
Geänderter Datensatz des Berichts
Archivnummer 107 447, 5.10.1990
- /NLfB 91/ Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung
Der Nordrand des Modellgebietes Konrad und Abschätzung
der Verdünnung

7 Unterlagen

- /EU 76.1/ Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig
Langzeitsicherheitsanalyse des Endlagers Konrad:
Radionuklidenausbreitung in der Nachbetriebsphase
TA 2242.03,9K/21285/ /-/-/-/ED/-/Rev. 0
- /EU 197/ Grundlagen der Modellrechnung für ein alternatives
hydrogeologisches Modell zur Langzeitsicherheit
BGR-Archivnr. 103265, August 1988

/EU 210/

Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung mit dem
Programm FEM301 für ein alternatives geologisch-
hydrologisches Modell
Motor Columbus, November 1988